

Kai Borgeest

Elektronik in der Fahrzeugtechnik

Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement

2. Auflage

PRAXIS



VIEWEG+
TEUBNER



ATZ

Kai Borgeest

Elektronik in der Fahrzeugtechnik

Kai Borgeest

Elektronik in der Fahrzeugtechnik

Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 191 Abbildungen und 28 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



VIEWEG+
TEUBNER

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Das in diesem Werk enthaltene Programm-Material ist mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Der Autor übernimmt infolgedessen keine Verantwortung und wird keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Höchste inhaltliche und technische Qualität unserer Produkte ist unser Ziel. Bei der Produktion und Auslieferung unserer Bücher wollen wir die Umwelt schonen: Dieses Buch ist auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier gedruckt. Die Einschweißfolie besteht aus Polyäthylen und damit aus organischen Grundstoffen, die weder bei der Herstellung noch bei der Verbrennung Schadstoffe freisetzen.

1. Auflage 2008
- 2., überarbeitete und erweiterte Auflage 2010

Alle Rechte vorbehalten
© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2010

Lektorat: Reinhard Dapper | Walburga Himmel

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Technische Redaktion: FROMM MediaDesign, Selters/Ts.
Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0548-5

Vorwort

Im Sommersemester 2005 hielt ich an der Hochschule Aschaffenburg erstmalig die Vorlesung „Kfz-Elektronik“ für Studenten der Mechatronik und der Elektrotechnik, beide im achten Semester. Das Ziel sollte sein, die Teilnehmer, die bereits Kenntnisse in Elektronik und Informatik mitbringen, zu befähigen, erfolgreich die vielen interessanten Aufgaben bei einem Automobilzulieferer oder einem Autohersteller zu meistern. Aber welche Kenntnisse sind das?

Man könnte nun jedes einzelne elektronische System im Fahrzeug detailliert vorstellen. Das mag sogar ganz interessant erscheinen (deswegen werden wir das auch im Buch tun, aber kurz und bündig), es hilft dem Ingenieur aber nicht unbedingt weiter, zuverlässige Produkte unter den Anforderungen der Automobilbranche zu entwickeln. Oft arbeitet er lange Zeit nur an einem Teilsystem im Fahrzeug, muss dieses Teilsystem aber in all seinen Facetten (Hardware, Software, Gesamtsystem) kennen. Er muss wissen, wie ein Elektronikmodul aufzubauen ist, das mal mit der Temperatur des heißen Motorraums arbeiten muss und mal mit klirrendem Frost. Neben den Temperaturen gibt es noch weitere Anforderungen, die aus anderen Anwendungsfeldern der Elektronik nicht so bekannt sind. Eine ganz besonders wichtige Anforderung ist der Preis. Noch größer sind die Unterschiede bei der Software. Wer sich mit PC gut auskennt, wird schnell bemerken, dass Steuergeräte im Auto im Vergleich zum PC recht eigenartige Rechner sind. Ein Entwicklungsingenieur im Automobilbereich sollte auch einige grundlegende Kenntnisse zum Thema Zuverlässigkeit mitbringen.

Wenn es bei der Entwicklung von Kfz-Elektronik zu Problemen kommt, sind dies aber meist gar keine technischen Probleme. Entwickelt wird nicht alleine in der Dachkammer, sondern in einem Team, dabei arbeiten Zulieferer und Fahrzeughersteller sehr eng zusammen. Ein Entwicklungsingenieur bei einem Zulieferer kann durchaus täglichen Kundenkontakt haben, ein Entwicklungsingenieur bei einem Fahrzeughersteller hingegen hat keinen Kontakt zu seinen Kunden, den späteren Käufern. Neben der reinen Technik spielen Entwicklungsabläufe eine große Rolle. Und ein enormer Zeitdruck. Der Ingenieur muss auch verstehen, „wie“ richtig entwickelt wird.

Damit ist das Programm einer Vorlesung mit 4 Semesterwochenstunden dann auch mehr als gefüllt. Nun fehlt nur noch ein passendes Buch zur Vorlesung. Es gibt einige gute Bücher zu Teilaspekten, es gab aber keines, das unmittelbar zur Vorlesung passte. So entstand dieses Buch. Es ist etwas dicker geworden, an einigen Stellen geht es über die Vorlesung hinaus, es dürfte nun aber alles drin stehen, was man benötigt, um Kfz-Elektronik zu entwickeln.

Kein Buch entsteht allein dadurch, dass man es einfach schreibt. So möchte ich vor allem Herrn Dapper vom Vieweg Verlag für die gute Zusammenarbeit danken.

Wenn im Buch die Bedeutung des Testens für die technischen Systeme im Fahrzeug betont wird, gilt das auch für das Buch selbst. „Testen“ bedeutet hier vor allem, das Buch noch einmal gründlich nach Fehlern und Verbesserungsmöglichkeiten zu durchsuchen. Daher möchte ich auch allen danken, die kleinere oder auch größere Teile noch einmal aus einem anderen Blickwinkel gelesen haben, nämlich den Herren Prof. Dr.-Ing. Jörg Abke, Dipl.-Ing. Björn Arnold, Dipl.-Ing. Marian-Peter Bawol, Dipl.-Ing. Harald Wojtkowiak und Frau Dr.-Ing. Mingli Bai.

Danken möchte ich auch Herrn Schreier (Akkumulatorenfabrik Moll), Frau Dangel und Herrn Dietsche (Robert Bosch GmbH), Herrn Schäfer (Sharp Electronics GmbH) und Herrn Thureau (VTI Technologies Oy) für die Unterstützung beim Bildmaterial.

Aschaffenburg, im November 2007

Kai Borgeest

Vorwort zur 2. Auflage

Seit der 1. Auflage gab es zahlreiche Veränderungen, die in die 2. Auflage eingearbeitet wurden, die erfreulichste: In der Einleitung der 1. Auflage war noch von den ca. 5000 Toten im deutschen Straßenverkehr die Rede, im Jahr 2008 waren es nur noch 4467, nach ersten Schätzungen im Jahr 2009 noch weniger. Zusätzlich gab es seit der 1. Auflage kleinere und größere Weiterentwicklungen sowie neue gesetzliche Vorgaben und Normen.

Die Anregung von Lesern, die Themen Elektro-/Hybridfahrzeuge sowie EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit) auszubauen, habe ich gerne aufgegriffen, zumal ich auf letzterem Gebiet tätig war, bevor ich in die Autoindustrie ging.

Aufgrund der Aktualität wurde auch das Thema Abgasnachbehandlung aus Sicht der Elektronik ausgebaut.

Neben diesen Kernpunkten gibt es viele kleinere Erweiterungen. Als alles geschrieben war, betrug der Umfang zeitweilig über 420 Seiten, damit begann die Phase der Layout-Tricks, um möglichst viele neue Inhalte unterzubringen, ohne den Umfang zu sehr zu erweitern.

Zunächst möchte ich Frau Fromm (Fromm MediaDesign) für ihre Unterstützung danken, nach der Ablieferung der 1. Auflage und der 2. Auflage eine Druckvorlage zu bereiten. Für die 2. Auflage danke ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Teigelkötter, der als Experte für elektrische Maschinen das neue Kapitel durchsah und sein Elektrofahrzeug fotogen bereitstellte. Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Bochtler möchte ich für die Fototour in sein EMV-Labor danken, auch wenn aus Platzgründen nicht alle Fotos untergebracht werden konnten.

Aschaffenburg, im Januar 2010

Kai Borgeest

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Einleitung	1
2 Bordelektrik	3
2.1 Bordnetz	3
2.1.1 Leitungen und Kabelbäume	4
2.1.2 Verdrahtungspläne	6
2.1.3 Steckverbinder	7
2.1.4 Sicherungen	8
2.2 Energiespeicher	9
2.2.1 Bleiakkumulatoren	11
2.2.2 Nickel-Cadmium-Akkumulatoren	12
2.2.3 Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren	12
2.2.4 Li-Ionen-Akkumulatoren	12
2.2.5 Natrium-Schwefel-Akkumulatoren	13
2.2.6 Kondensatoren als Energiespeicher	13
2.2.7 Brennstoffzellen	15
2.2.8 Weitere Energiespeicher	17
2.3 Mehrspannungs-Bordnetz	17
2.4 Energiemanagement	19
3 Hybridantriebe und elektrische Antriebe	21
3.1 Elektrische Maschinen	21
3.1.1 Gleichstrommaschinen	23
3.1.2 Synchronmaschinen	24
3.1.3 Asynchronmaschinen	25
3.1.4 Umrichter	26
3.2 Lichtmaschine	27
3.3 Starter	30
3.4 Starter-Generatoren	31
3.5 Hybridfahrzeuge	32
3.6 Elektrofahrzeuge	35
3.6.1 Brennstoffzellen-Fahrzeuge	37
3.6.2 Fahrzeuge mit Aufladung am öffentlichen Netz	37
3.6.3 Solarfahrzeuge	38
4 Beispiel Elektronische Dieselsteuerung (EDC)	39
4.1 Aufgaben	40
4.2 Einspritzung	40
4.2.1 Winkeluhr	41

4.2.2	Berechnung der Einspritzmenge	44
4.2.3	Berechnung des Spritzbeginns	45
4.2.4	Ansteuerung des Einspritzsystems	46
4.2.5	Ansteuerung der Injektoren	47
4.2.6	Regelung des Raildrucks	53
4.3	Drehzahlregelung	54
4.4	Regelung des Luftsystems	55
4.4.1	Abgasrückführung	56
4.4.2	Aufladung	61
4.5	Abgasnachbehandlung	63
4.5.1	Partikelfilter	64
4.5.2	Stickoxid-Filter	66
4.5.3	Lambda-Sonde	68
4.5.4	NO _x -Sonde	70
4.5.5	Ruß-Sensoren	70
4.6	Thermomanagement	70
5	Bussysteme	73
5.1	Zuordnung von Funktionen zu Geräten	73
5.2	Kfz-Elektronik als LAN	75
5.3	CAN-Bus	78
5.3.1	Physikalische Schicht des CAN	80
5.3.2	Sicherungsschicht des CAN	90
5.3.3	Beispiele für aufgesetzte Protokollschichten	98
5.4	Weitere Bussysteme	99
5.4.1	LIN	99
5.4.2	Zeitgesteuerte Bussysteme (Byteflight, TTCAN, TTP, FlexRay)	101
5.4.3	Busse für Rückhaltesysteme	105
5.4.4	Busse für Multimedia-Anwendungen	106
5.4.5	Drahtlose Netze	108
5.5	Praktisches Vorgehen	108
6	Hardware	111
6.1	Steuergeräteschaltungen	111
6.1.1	Rechnerkern	113
6.1.2	Sensorik	122
6.1.3	Auswertung von Sensorsignalen	125
6.1.4	Ansteuerung der Aktoren	132
6.1.5	Spannungswandler	142
6.2	Elektromagnetische Verträglichkeit	145
6.2.1	Störquellen und Störsenken	145
6.2.2	Kopplungsmechanismen	146
6.2.3	EMV-Normen und Gesetzgebung	151
6.2.4	Maßnahmen zur Sicherstellung der EMV	158
6.2.5	Simulation in der EMV	162
6.2.6	EMV-Mess- und Prüftechnik	163
6.3	Mechanische Anforderungen	166
6.4	Thermische Anforderungen	167

6.5 Chemische Anforderungen und Dichtigkeit	172
6.6 Anforderungen an den Umweltschutz	174
6.7 Akustische Anforderungen	175
6.8 Aufbau- und Verbindungstechnik	175
7 Software	177
7.1 Architektur der Steuergeräte-Software	177
7.2 Echtzeit-Betriebssysteme	180
7.2.1 Aufgaben eines Echtzeit-Betriebssystems	180
7.2.2 OSEK/VDX	183
7.2.3 AUTOSAR	187
7.3 Steuer- und regelungstechnische Funktionen der Software	188
7.3.1 Steuerungen	188
7.3.2 PI- und PID-Regler	190
7.3.3 Modellbasierte Regler	194
7.4 Diagnosefunktionen der Software	200
7.4.1 Erkennung und Behandlung von Fehlern	202
7.4.2 Entprellung und Heilung von Fehlern	203
7.4.3 Fehlerspeicher-Management	204
7.4.4 Kommunikation zwischen Steuergerät und Tester	204
7.4.5 On-Board-Diagnose (OBD)	210
7.4.6 Programmierung über die Diagnose-Schnittstelle	213
7.4.7 ODX	214
7.5 Entwicklung der Anwendungs-Software	215
7.5.1 Programmierung	215
7.5.2 Bypass	218
7.5.3 Datensatz und Applikation	218
7.5.4 Softwaretests	224
7.5.5 Flash-Programmierung	231
8 Projekte, Prozesse und Produkte	235
8.1 Besonderheiten der Kfz-Branche	235
8.2 Stufen der Elektronik-Entwicklung	237
8.3 Projekte und Prozesse	239
8.4 Projekte in der Praxis	241
8.5 Projektphasen	242
8.5.1 Akquisitionsphase	242
8.5.2 Planungsphase	245
8.5.3 Entwicklungsphase	261
8.6 Product Lifecycle Management	265
8.7 Architekturbasierte Entwicklung	266
8.8 Serienbetreuung	267
8.8.1 Serienbetreuung durch die Entwicklung	267
8.8.2 Produktion	267
8.8.3 Service	269
8.9 Qualität	270
8.9.1 Qualitätsmanagement	272
8.9.2 Qualitätsstandards	277

9 Sicherheit und Zuverlässigkeit	281
9.1 Ausfälle elektronischer Systeme	282
9.1.1 Alterung und Ausfall elektronischer Bauelemente	284
9.2 Ausfälle von Software	289
9.3 Methoden zur Analyse von Sicherheit und Zuverlässigkeit	290
9.3.1 FMEA	290
9.3.2 Fehlerbaumanalyse	292
9.3.3 Ereignisfolgenanalyse	294
9.4 Verbesserungsmaßnahmen	295
9.4.1 Qualifizierung von Bauelementen	295
9.4.2 Überwachung und Diagnose	296
9.4.3 Komplexität und Redundanz	296
10 Anwendungen	299
10.1 Funktionsentwicklung am Beispiel Klimaregelung	299
10.1.1 Prinzip der Klimaregelung	299
10.1.2 Struktur der Klimaregelung (Beispiel)	300
10.1.3 Funktionsentwicklung im Klimasteuergerät (Beispiel)	301
10.2 Systeme im Antriebsstrang	303
10.2.1 Motorsteuergeräte (Otto)	303
10.2.2 Steuergeräte für variable Nockenwellen	306
10.2.3 Getriebesteuergeräte	309
10.2.4 Kupplungssteuergeräte	310
10.2.5 Elektronische Differenzialsperre	310
10.3 Systeme für die Fahrdynamik und die aktive Sicherheit	311
10.3.1 Längsdynamik und Bremsen	312
10.3.2 Querdynamik, Lenkung und ESP	316
10.3.3 Vertikaldynamik	319
10.3.4 Reifenüberwachung	321
10.4 Systeme für die passive Sicherheit	322
10.4.1 Airbag	322
10.4.2 Gurtstraffer	324
10.4.3 Fußgängerschutz	324
10.5 Fahrerassistenz- und Informationssysteme	324
10.5.1 Spurhalte- und Spurwechselassistenten	324
10.5.2 Einparkhilfen	325
10.5.3 Navigationssysteme	325
10.5.4 Telematik	329
10.5.5 Scheibenreinigungssysteme	331
10.5.6 Beleuchtung	331
10.5.7 Nachtsichtsysteme	333
10.6 Mensch-Maschine-Schnittstelle	334
10.7 Komfortsysteme	337
10.8 Unterhaltungselektronik	338
10.9 Diebstahlschutz	339

11 Selbstbau und Tuning	341
12 Zukunftstechnologien im Fahrzeug	343
12.1 Adaptronik	343
12.1.1 Beispiel Motorlagerung	344
12.1.2 Beispiel Strukturversteifung mit Memory-Metallen	346
12.2 Nanotechnologie	346
12.3 Photonik	346
12.4 Weitere Zukunftsentwicklungen	347
A Abkürzungen	348
B Symbole in Formeln und Naturkonstanten	355
C Literaturverzeichnis	358
Sachwortverzeichnis	375

1 Einleitung

Der Ruf des Autos war vor 20 Jahren geprägt durch die hohe Umweltbelastung, durch zahlreiche Verkehrstote und durch wenig komfortables Reisen auf langen Strecken. Zwar belastet der Straßenverkehr auch heute noch die Umwelt, sind auch heute 4467 Verkehrstote jährlich 4467 zu viel¹ und eine weite Reise ist, wenn man nicht die inzwischen gut ausgebauten Hochgeschwindigkeitsnetze der Bahn oder das inzwischen erschwingliche Flugzeug nutzt, immer noch beschwerlich. Trotzdem hat es in diesen 20 Jahren gewaltige Verbesserungen beim Umweltschutz, bei der Sicherheit und beim Komfort gegeben. Während die Verbesserung der passiven Sicherheit maßgeblich auf konstruktive Verbesserungen der Karosserie und des Interieurs zurückzuführen ist, gehen beim Umweltschutz (Motormanagement, Abgasnachbehandlung), bei der aktiven Sicherheit (ABS, ESP) und beim Komfort diese Verbesserungen überwiegend auf das Konto der Elektronik. Und selbst bei den Fortschritten in der passiven Sicherheit durch den Airbag war die Elektronik nicht ganz unbeteiligt.

Diese Entwicklungen sind keinesfalls abgeschlossen, sondern stellen auch zukünftig Ingenieure vor reizvolle Aufgaben. Bei PKW ist mit neuen Antriebskonzepten wie Hybridantriebe zu rechnen, die von japanischen Herstellern bereits in Serie gebracht wurden. Viele Fortschritte, die bei PKW bereits gemacht wurden, werden bei Nutzfahrzeugen und Zweirädern folgen. Während bei der passiven Sicherheit bereits ein hoher Stand erreicht ist, bieten die aktive Sicherheit und vor allem die Kombination aktiver und passiver Sicherheit neue Möglichkeiten. Da immer mehr ältere Menschen Auto fahren, werden Fahrerassistenzsysteme, die den Fahrer informieren, warnen und ggf. auch eingreifen, an Bedeutung gewinnen. Wenn Ingenieure neben ihrer Liebe zum technischen Detail auch permanent den Kundennutzen im Auge behalten, wird es sicher auch noch weitere sinnvolle Verbesserungen im Bereich Komfort und Unterhaltung geben.

Daneben gibt es weitere Fortschritte, so ermöglichen inzwischen auch die traditionell eher mit Traktoren assoziierten Dieselmotoren eine sportliche Fahrweise, 2006 siegte zum ersten Mal ein Dieselfahrzeug in Le Mans. Auch wenn dies dem gewöhnlichen Autofahrer nichts nützt, so erfährt auch dieser in immer mehr Fahrzeugen, dass ein Dieselmotor durchaus Spaß machen kann. Daneben entstehen neuartige Verbrennungsmotoren, die in vielerlei Hinsicht zwischen heutigen Diesel- und Ottomotoren angesiedelt sein werden, zurzeit aber noch den Status von Forschungsprojekten haben. Auch diese lassen sich nur mit Hilfe präziser elektronischer Regelungen realisieren.

Durch elektronische Diagnosesysteme kann eine aufwändige Fehlersuche theoretisch erheblich vereinfacht werden (in der Praxis trifft dies allerdings nicht immer zu).

Weitere Fortschritte, die sich erst anbahnen, liegen in der Vernetzung der Fahrzeuge untereinander und in der Kommunikation zur Infrastruktur. Damit wachsen Fahrzeuge und die Strassen langfristig zu einem aufeinander abgestimmten System zusammen. Insbesondere im Nutzfahrzeugbereich wird das einzelne Fahrzeug ein integraler Bestandteil von logistischen Konzepten.

Ein nützlicher Nebeneffekt der Weiterentwicklungen ist die Sicherung von Arbeitsplätzen, vor allem, wenn die deutsche Automobilindustrie auch bei zukünftigen Entwicklungen die Nase vorne behält und nicht Entwicklungen verschläft.

1 1998 laut statistischem Bundesamt [Destat09]

Bei aller Freude über die Verbesserungen dürfen jedoch auch die Kehrseiten nicht gelehnet werden.

Ein wesentlicher Nachteil ist die hohe Komplexität. Wo Zuverlässigkeit gefordert ist, gilt nach wie vor der klassische Grundsatz, ein System so einfach wie möglich zu halten. Genau dies geschieht durch den massiven Elektroneinsatz im Fahrzeug nicht mehr. Wer einmal in einer kalten Winternacht aufgrund eines Softwarefehlers mit seinem Fahrzeug liegen blieb, wird die bisherige Marke vermutlich meiden und seine Erfahrungen auch Freunden und Verwandten mitteilen. Wenn ein elektronisches Lenksystem aufgrund eines Softwarebugs beschließt, den nächsten Baum anzusteuern, wäre dies noch weitaus schlimmer. Leider zeigt sich, dass insbesondere in der Oberklasse zunehmend negative Erfahrungen mit der Zuverlässigkeit gemacht wurden. Um auch komplexe Systeme mit hinreichender Zuverlässigkeit zu realisieren, genügt es nicht, nur das fertige Produkt zu betrachten. Vielmehr müssen die Prozesse und Abläufe zur Entwicklung eines Gerätes oder Systems selbst erst entwickelt werden. Der Ingenieur muss also nicht nur im Auge haben, was bei der Arbeit eines Entwicklungsteams am Ende herauskommen soll, sondern auch, auf welchem Wege er dieses Ziel unter schwierigen Randbedingungen (Zeitdruck, Kostendruck) sicher erreicht, ohne Abstriche bei der Qualität hinzunehmen.

Ebenfalls wenig Begeisterung löst der steigende Elektronikumfang bei Autofahrern aus, die bisher zahlreiche Wartungsarbeiten und Reparaturen selbst durchgeführt haben. Diese machen die Erfahrung, dass die elektronische Diagnose zwar hilfreich sein kann, dass eventuell aber viele Arbeiten auch gar nicht mehr selbst, sondern nur noch durch eine Werkstatt durchgeführt werden können. Dies ist leider manchmal sogar beabsichtigt, da der Service eine wichtige Einnahmequelle darstellt. Die Elektronik bietet insofern einen Vorteil für den Hersteller und evtl. einen Nachteil für den Kunden, als der Hersteller inzwischen relativ frei gestalten kann, welche Tätigkeiten er noch dem Halter zugesteht und für welche Tätigkeiten ein zeitaufwändiger, aber lukrativer Werkstattbesuch nötig ist.

2 Bordelektrik

Lange bevor elektronische Steuergeräte Einzug in das Fahrzeug hielten, gab es einfache elektrische und elektromechanische Systeme wie die Beleuchtung oder die Zündung. Diese Systeme benötigten Energie, was geeignete Energiequellen und die Weiterleitung der Energie über Kabel erforderte. Der Begriff *Bordelektrik* wird als Sammelbegriff für klassische elektrische Anlagen und moderne elektronisch gesteuerten Systeme verstanden. Da die elektronischen Systeme später vertieft werden, sollen in diesem Kapitel zunächst nur das Bordnetz, Energiequellen und das Energiemanagement betrachtet werden. Hybridantriebe oder reine Elektroantriebe können als Weiterentwicklung des Energiemanagements und der elektrischen Maschinen im Fahrzeug verstanden werden, setzen dieses Kapitel also logisch fort. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung ist diesen Antrieben nun ein eigenes Kapitel in dieser Auflage gewidmet. Da Zündanlagen heute elektronisch arbeiten, sind diese im Kapitel 10 untergebracht.

2.1 Bordnetz

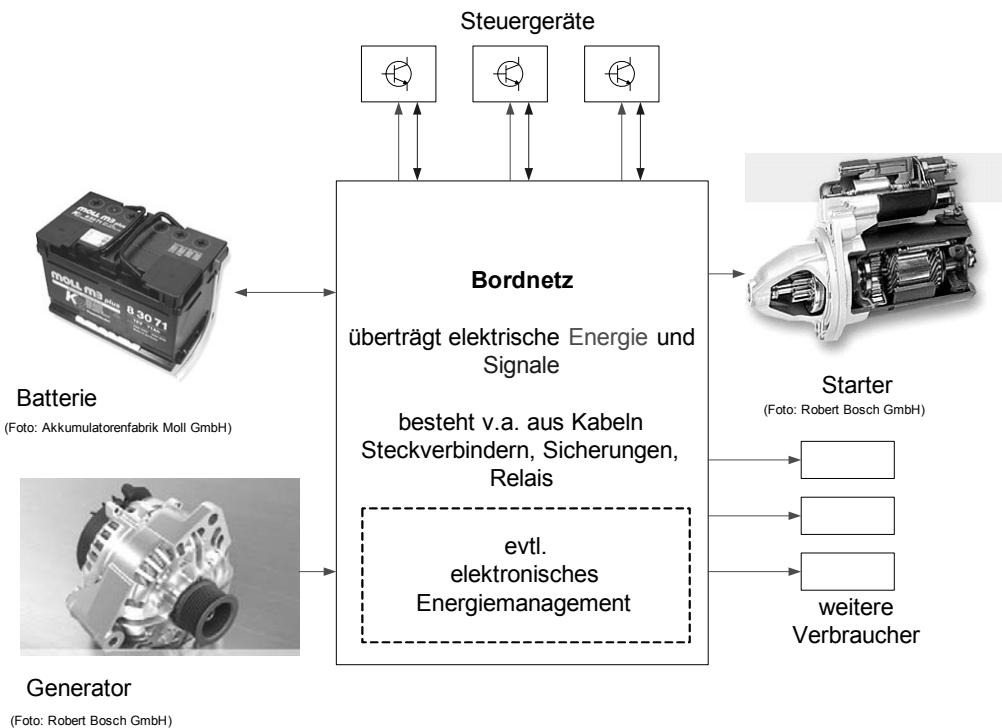


Bild 2-1 Überblick über das Bordnetz

Unter dem Begriff Bordnetz sei hier das System von Leitungen verstanden, das zum einen Energie von den Energiequellen im Fahrzeug (Batterie/Generator) zu den Verbrauchern überträgt, zum anderen aber auch Signale und Informationen elektrisch und in Einzelfällen auch optisch überträgt.

Während sich an den Energieflüssen in den letzten Jahrzehnten bis auf die Zunahme zahlreicher Kleinverbraucher nicht viel geändert hat, ist der Informationsaustausch zwischen den immer mehr werdenden elektronischen Steuergeräten geradezu explodiert. Dies führte dazu, dass Informationen heute über digitale Bussysteme wie den CAN-Bus übertragen werden, die in Kapitel 5 näher vorgestellt werden. Eine weitere Stufe zur Beherrschung der zunehmenden Verkabelung wäre die drahtlose Signalübertragung. In der Praxis scheitert diese aber an den zahlreichen abschirmenden Metallstrukturen im Fahrzeug und an den zu erwartenden Problemen im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV). Die teils hitzig geführte öffentliche Diskussion über eventuelle Gesundheitsrisiken elektromagnetischer Wellen in bestimmten Frequenzbereichen, häufig unter dem unscharfen Schlagwort „Elektrosmog“ zusammengefasst, könnte der Akzeptanz eines Modells mit drahtlosen Techniken schaden.

2.1.1 Leitungen und Kabelbäume

Die häufigste Ursache für Fahrzeugbrände sind Kabelbrände, deshalb müssen alle Leitungen so ausgelegt sein, dass sie sich auch bei den teilweise sehr hohen Strömen nicht unzulässig erwärmen. Kurzschlüsse müssen durch Sicherungen verhindert werden.

Um eine unzulässige Erhitzung von Kabeln im normalen Betrieb zu verhindern, darf die zulässige Stromdichte S nicht überschritten werden. Aus dem Strom I und dem Leitungsquerschnitt A definiert sie sich zu

$$S = \frac{I}{A} \quad (2.1)$$

Die zulässige Stromdichte hängt davon ab, ob es sich um einen Einzelleiter oder eine Litze handelt, vom Leitermaterial (praktisch nur Kupfer), außerdem von der Dicke und vom Material der Isolierung. Als grobe Richtwerte können zulässige Stromdichten von 5 A/mm^2 für den Dauerbetrieb und von 10 A/mm^2 für kurzzeitige Stromspitzen angenommen werden. Wird die zulässige Stromdichte überschritten, führt die Verlustleistung P_V in der Leitung zu einer Überhitzung und damit zum Schmelzen, zur Zersetzung oder zum Brennen des Isoliermaterials oder angrenzender Strukturen. Die Verlustleistung beim Strom I ergibt sich zu

$$P_V = I^2 R \quad (2.2)$$

mit

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.3)$$

Darin ist l die Länge der Leitung, ρ der spezifische Widerstand des Leiters (bei Kupfer $0,0185 \text{ } \Omega\text{mm}^2/\text{m}$). Der Strom I kann aus der Leistung des Verbrauchers P und der anliegenden Spannung U bestimmt werden mit der Formel

$$I = \frac{P}{U} \quad (2.4)$$